

氏 名	エーエーモハメド モンズル ウル アキル A. A. MOHAMMAD MONZUR-UL-AKHIR
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 番 号	富理工博甲第 140 号
学位授与年月日	平成 30 年 3 月 23 日
専 攻 名	ナノ新機能物質科学専攻
学位授与の要件	富山大学学位規則第 3 条第 3 項該当
学 位 論 文 題 目	Heteroepitaxial Growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ Film(s) on Si(111) Surface With High Quality GaSb Buffer Layer (高品質 GaSb バッファ層を用いた Si(111)表面への In_x Ga_{1-x}Sb 膜のヘテロエピタキシャル成長)
論 文 審 査 委 員 (委員長)	伊藤 弘昭 前澤 宏一 岡田 裕之 中 茂樹 森 雅之

Abstract

Heteroepitaxial Growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ Film(s) on Si(111) Surface With High Quality GaSb Buffer Layer

Department: Nano & Functional Materials Sciences

Name: A. A. Mohammad Monzur-Ul-Akhir

Supervisor: Dr. Masayuki Mori (Associate Professor)

III-V semiconductors have been a crucial group to research as the Electronic and Optoelectronic devices suit them. InSb has huge acceptance due to its smallest band gap, the highest electron mobility and lowest electron effective mass among all the III-V semiconductor materials. These properties have created interest for InSb on Si for infrared detectors, magnetic field sensors, and high-speed devices. Device applications requiring strong, plain and large size low-cost substrates, Si have been of interest to the researchers. Also, the high-quality advanced silicon process technology has enabled us to use Si substrates for InSb growth. But the growth of InSb on Si substrates is very difficult due to the large lattice mismatch ($\approx 19.3\%$). Despite several scientific difficulties like stacking faults and anti-phase domain due to large lattice mismatch, researchers are looking for a solution. Despite growth difficulties, Large Scale Integration (LSI) of InSb on Si substrates are also a requirement.

In addition to the above, the addition of new material(s) can cause remarkable problems which have been reported by different research groups through different heteroepitaxial layers. To the continuation, this study has been performed where the intermediate layers of GaSb and InGaSb provide a wider band gap. With this study, the other types of heterostructures like SiC/Si, InGaAs on GaAs can also be realized and understood. The flat grown surface is an industrial requirement for the Quantum advance devices. In this study, we have focused on the crystal quality where both GaSb

and InSb can be grown on the same Si(111) substrate for CMOS fabrication deploying an intermediate layer of InGaSb. Here, GaSb with a wider band gap can act as a buffer layer and InGaSb with a relatively wider band gap compared to InSb can separate the GaSb and InSb layers. The GaSb layer provides a p-type, and InSb layer provides an n-type channel layer for CMOS. Also, the smooth surface of the epitaxy with single crystalline nature of both GaSb and InSb on the same Si(111) substrate is expected which has been attempted in this study. This has the potentiality to reduce leakage current as well.

Our group has already reported different growth conditions on different surfaces of Silicon but the growth of III-V compound semiconductor was proved to be the best on Si(111). This present study addresses the issues of growth condition and nature of III-Sb based semiconductors precisely GaSb, InGaSb, InSb, and their heteroepitaxial growths to produce InSb channel layer on GaSb buffer and $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ intermediate layers on same Si(111) substrates with the single crystalline in nature which will potentially produce better electrical properties.

Initially, the growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ was observed on Si(111) with and without GaSb buffer layer to compare the growth nature and the effectiveness of the GaSb buffer layer. A further progress in the implementation of wider band gap material namely $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ is observed by depositing the InSb channel layer on $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$. In this study, GaSb/Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ga base template was found effective. All the samples have been analyzed with RHEED, SEM and XRD ϕ scan and $2\theta/\omega$ scan. Here, the HQ GaSb thin films have shown remarkable influence in producing smoother surface layers reducing defects whereas the roughness remains responsive to the increase of Gallium content. Also, the electrical properties advocates for HQ GaSb buffer layer.

In the second step, 40 nm InSb channel layer was grown on $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ where $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ was grown on HQ GaSb buffer layer as mentioned in step one. In this case, the single crystalline nature of InSb found earlier for GaSb and $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ films in the previous step. The RHEED patterns were unchanged while showing the same level of bright and longer streaks proving 2×2 well-ordered crystal growth. SEM images show the same properties by indicating defect less smooth surface where roughness is observed to be responsive to increase in Gallium content. In both cases the XRD ϕ scan and $2\theta/\omega$ scan of the InGaSb layer, it has been observed that in most of the cases the

samples show a twin eliminated or eliminating tendency. In this case, the Gallium content is effective to suppress the anti-phase domain and reduce or eliminate twin tendency. The electrical properties of InSb film create interest as well.

The mirror polished p-type Si(111) substrate of the specific size was used and 18 nm HQ GaSb film was deposited in each case before the deposition of the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ film where x varies from 0.90~0.75 at a step of 0.05. The deposition time for HQ GaSb buffer, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ intermediate and InSb channel layers were about 30 min, 120 min and 10 min to produce a thin film of 18 nm, 400~500 nm, and 40 nm respectively.

In conclusion, it can be inferred that HQ GaSb is influential in producing other layers with single crystalline nature and with a better smooth surface to end up with a final InSb channel layer.

博士学位論文審査結果の要旨

平成 30 年 2 月 15 日

富山大学大学院理工学教育部長 殿

博士学位論文審査の結果の要旨について、下記のとおり報告します。

審査委員

主査 伊藤 弘昭 印

記

1. 学位申請者 : A. A. Mohammad Monzur-Ul-Akhir
2. 論文題目 : Heteroepitaxial Growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ Film(s) on Si(111) Surface With High Quality GaSb Buffer Layer
3. 審査結果要旨 : 本論文は、双晶を含まない高品質な GaSb をバッファ層として用いて、III-V 族化合物半導体である $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ 薄膜及び InSb 薄膜を、Si(111)基板上にヘテロエピタキシャル成長させた結果について報告している。
第 1 章~第 5 章では、これまでに報告されている、表面再構成制御成長法を用いた Si 上 InSb 系超高速・超低消費電力デバイスの作製に関する研究結果を示したうえで、InSb/ Al_2O_3 界面における大きな界面準位密度、Si 基板へのリーク電流、チャンネル層である InSb が双晶を含んでいる点など、問題点を明らかにし、InSb 系デバイスの特

性向上を結晶成長の観点からの解決法について、その方法、手順などの研究計画が記載されている。具体的には、InSb/Al₂O₃ 界面並びに InSb/Si 界面への InGaSb 層の挿入及び、双晶を含まない GaSb バッファ層を介した InGaSb 及び InSb 層の成長である。また、この実験の基礎かつ重要な部分となる、Si 基板上における In、Ga 及び Sb 原子が誘起する表面再構成構造、及びそれらを用いたヘテロエピタキシャル成長について、さらに使用する実験装置及び手順についても解説している。

第 6 章では、 $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ga 表面再構成構造を介した GaSb バッファ層の成長に関して、成長時の V/III フラックス比(Sb/Ga)を変化させた場合の表面性、結晶性について RHEED、SEM、XRD の結果を用いて議論している。Ga-rich、Sb-rich、Sb/Ga=1 など様々な成長条件で多くの試料を作製し、RHEED や SEM の結果から Sb/Ga 比が 1 からずれると表面性に影響を及ぼすが、双晶の有無に関しては多少 Sb/Ga 比がずれても双晶を含まない GaSb を成長できることを明らかにした。また、無極性の Si 上に有極性の GaSb が双晶を含まずに成長できる原因を解明するために、 $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ga 表面相の有無、低温成長、低成長レートを変えて実験を行い、それらの結果をもとに、GaSb の性質を含めてそれぞれの可能性について議論した。

第 7 章では、第 6 章で示した高品質な GaSb 層をバッファ層として用いて、双晶を含まない InGaSb 薄膜が成長できるかについて検討している。高品質 GaSb バッファ層を介して成長させたものと、 $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ga 表面相上に直接成長させた試料を、Ga 組成を 0.1~0.25 まで変化させて作製し、RHEED、SEM、XRD によって評価した。前者の試料は、表面性、結晶性共に良好であり、ほとんど双晶を含んでいなかったが、後者の試料では、ヘテロエピタキシャル成長はしているものの、表面が荒くまた、非常に多くの双晶を含んでいた。これらの結果から、双晶を含まない高品質な GaSb をバッファ層として用いることで、双晶の無い InGaSb 薄膜が成長できることを示した。この結果は、さらに上に InSb を成長させることで、双晶を含まない InSb 薄膜が成長できる可能性を示している。

第 8 章は、第 7 章の結果を受けて、InGaSb/GaSb/Si 基板上に双晶を含まない高品質な InSb 薄膜が成長できるか検討している。実際に第 7 章で作製した試料と同様の InGaSb 薄膜の上に厚さ 40nm の InSb を成長させ、表面性、結晶性、電気的特性によって評価した。作製した試料の表面は非常に平坦であり、XRD ϕ スキャンパターンの結果から、双晶を含んでいないことが分かった。また、電気的特性についても評価を行ったが、試料の特性のばらつきや測定の問題などにより、妥当な結果を得るまでには至らなかった。

双晶を含まない高品質な GaSb バッファ層を用いることで、表面性や結晶性を損なうことなく、双晶を含まない InGaSb や InSb 層を成長させることができた。今後、無極性材料である Si 上に有極性材料の GaSb が単結晶成長するメカニズムの解明、膜の結晶性の向上、さらにデバイスを作製し評価することで特性向上を検証することなど、行うべき点は多いものの、これまでに報告例のない Si(111)基板上に双晶を含まない InSb を成長している点、並びにこの結果に至るまでのプロセス及び議論の内容を鑑み、博士論文授与に足るものと考えられる。